
Ultraschallwandler

Die vorliegende Erfindung betrifft einen Ultraschallwandler sowie einen Lautsprecher mit einer Vielzahl von Ultraschallwandlern.

5 Ultraschallstrahler finden Anwendung in Bewegungs- und Abstandssensoren, Anemometer, Flow-meter, in sogenannten parametrischen Lautsprechern (AudioBeam) u.s.w.. In allen diesen Anwendungen erwartet man vom Strahler neben einen guten Richtwirkung hohe Effektivität, d.h. hohen erreichbaren Schalldruck. Bei den Abstandssensoren und dem Flowmeter bestimmt die Breitbandigkeit
10 der Wandler deren Genauigkeit.

Ein in einer unendlichen, starren Wand schwingender Kolbenstrahler mit dem Radius a und der Schnelle v erzeugt in einem bestimmten Abstand r auf seiner Achse den Schalldruck, der durch die folgende Gleichung gegeben ist:

$$|p| = 2pcv \left| \sin \left[\frac{k}{2} \left(\sqrt{r^2 + a^2} - r \right) \right] \right| \quad (1)$$

Sinngemäß betrachten wir hier den Betrag des Schalldruckes. Der nach (1) berechnete Schalldruckverlauf in Abhängigkeit vom normiertem Abstand r / r_g , wobei $r_g = a^2 / \lambda$ dem Abstand entspricht, bei dem das letzte Maximum erreicht wird, ist in Fig. 1 dargestellt, wobei Fig. 1 eine Darstellung des Verlaufs des Schalldrucks zeigt.

Für das Fernfeld ($r \gg a^2/\lambda$) lässt sich Gleichung (1) vereinfachen

$$p = pcv \left(ka^2 / 2r \right) = \frac{pfvA}{r} \quad (2)$$

wobei $A=2\pi a^2$ die Fläche des Kolbens ist.

Es ist jetzt leicht zu zeigen, dass das mechano-akustische System des breitbandigen Wandlers massegehemmt sein muss: tatsächlich wächst dabei die mechanische Impedanz Z_M proportional zu der Frequenz: $Z_M = \omega m$, und für die Schnelle gilt: $v = F/\omega \cdot m$, wobei F die frequenzunabhängige Coulombkraft ist. Das Einsetzen des letzten Ausdrucks in Gleichung (2) zeigt, dass der Schalldruck nun unabhängig von der Frequenz ist.

Ähnlich lässt sich zeigen, dass bei steifigkeitsgehemmten Systemen ein mit 12 dB/Okt und bei widerstandsgehemmten Systemen ein mit 6 dB/Okt steigender Frequenzgang des Schalldruckes erhalten wird. Da die Impedanz der realen Systeme immer alle drei Komponenten (Masse m , Steifigkeit S oder Nachgiebigkeit C und aktiven Widerstand R) beinhaltet, hat der Frequenzgang des Wandlers immer drei - mehr oder weniger eindeutig erkennbare - Bereiche. Dies ist insbesondere in Fig. 2

gezeigt, welche einen typischen Frequenzgang eines Ultraschallwandlers darstellt. Bei tiefen Frequenzen, für die gilt $Z_M = 1/\omega \cdot C \gg \omega \cdot m$, steigt der Frequenzgang mit 12 dB/Okt an.

Bei höheren Frequenzen, wo gilt $\omega \cdot m \gg 1/\omega \cdot C$, verläuft der
5 Frequenzgang horizontal. Im kurzen Übergangsbereich, wo die reaktiven Impedanzkomponenten sich gegenseitig kompensieren, beobachten wir einen Frequenzganstieg von 6 dB/Okt.

Bei der Entwicklung eines breitbandigen Strahlers muß folglich die Resonanzfrequenz des Schwingungssystems an der unteren Grenze
10 des gewünschten Frequenzbereiches liegen. Da die Resonanzfrequenz durch das Produkt $m \cdot C$ bestimmt wird, haben wir dementsprechend eine gewisse Freiheit in der Auswahl von Masse und Nachgiebigkeit. Offensichtlich soll die Nachgiebigkeit des Systems möglichst groß sein, weil nur in diesem Fall die Bedingung $\omega \cdot m \gg 1/\omega \cdot C$ bei minimaler
15 Masse m erfüllt werden kann. Für ein massegehemmtes System muss also nicht die Masseimpedanz groß sein, sondern die Steifigkeitskomponente möglichst klein sein. Nur so können wir hohe Schnelle und letztendlich hohen Schalldruck erreichen.

An dieser Stelle muss noch die Frage der mechanischen Stabilität der
20 Membran betrachtet werden. Die Coulombkräfte zwischen Gegenelektrode und Membran, die letztere in Bewegung bringen, sind sehr schwach und vermindern sich mit dem Quadrat des Luftspaltes. Aus diesem Grund muss der Luftspalt möglichst klein sein. Hohe Schalldrücke erreicht man außerdem nur bei ausreichend großer
25 schwingender Fläche der Membran. Diese zwei Forderungen (für einen breitbandigen Wandler auch die Forderung an möglichst kleine Steifigkeit des Systems) widersprechen einander, da eine großflächige Membran von der Gegenelektrode angezogen werden kann und dabei die Fähigkeit zum Schwingen (und folglich zum Strahlen) verliert. Bei
30 den bekannten elektrostatischen Ultraschallwandlern löst man das

Problem mit Hilfe von unterstützenden Elementen an der inneren Oberfläche der Gegenelektrode. Als solche können Stege oder Säulen dienen wie in L. Pizarro, D. Certon, M. Lethiecq, O. Boumatar, B. Rosten „Experimental Investigation of Electrostatic Ultrasonic Transducers with
5 Grooved Backplates." 1997 IEEE ULTRASONIC SYMPOSIUM – 1003 and in Michael J. Anderson and James A. Hill „Broadband electrostatic transducers: Modeling and experiments. J. Acoust. Soc. Am. 97 (1), January 1995, gezeigt.

10 Verbreitet sind auch Ultraschallwandler, bei denen die Membran direkt auf der aufgerauhten Oberfläche der Gegenelektrode liegt. In allen diesen Fällen ist die Membran in viele kleine strahlende Zonen unterteilt. Durch die erhöhte mechanische Stabilität arbeiten solche Wandler mit wesentlich höheren Polarisations- und Signalspannungen. Entsprechend hoch ist dann auch der erreichbare Schalldruck.

15 Einen Aufbau des Ultraschallwandlers, der alle oben formulierten Forderungen am ehesten erfüllt, wurde in H.-J. Griesse, Wandler für Ultraschall-Fernsteuerungen, Funkschau 1973, Heft 9 beschrieben. Bei diesem Multi-Support-Wandler stützt sich die Membran auf kleine isolierende Scheibchen, die gleichmäßig auf der fein perforierten
20 Gegenelektrode verteilt sind. Die Höhe der Scheibchen bestimmt dabei den Luftspalt zwischen Gegenelektrode und Membran. Als Gegenelektrode wurde galvanisch hergestellte Ni-Blech (ca. 60µ dick, Löcher ca. 80µ, pitch 250µ) benutzt, der für Filtertechnik und Rasierapparate hergestellt wird. Da die Gegenelektrode perforiert ist,
25 spielt die Steifigkeit der Luft zwischen Membran und Gegenelektrode keine Rolle mehr. Die Gesamtsteifigkeit des Systems ist dabei nur durch die Membransteifigkeit bestimmt und kann so klein sein, dass das System schon ab 40 kHz als massegehemmtes System gebaut werden kann.

Bei der Konstruktion der Ultraschallwandler verfolgt man also zwei Ziele, nämlich minimale mögliche Verluste an schwingungsfähiger Membranfläche bedingt durch die Unterstützungsstruktur und möglichst ganzflächige und effektive Anregung der Membran.

- 5 Es ist somit eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung einen verbesserten Ultraschallwandler vorzusehen.

Diese Aufgabe wird durch einen Ultraschallwandler gemäß Anspruch 1 sowie durch einen Lautsprecher mit mindestens einem Ultraschallwandler gemäß Anspruch 6 gelöst.

- 10 Somit wird ein Ultraschallwandler mit einer Membran und einer geprägten Gegenelektrode vorgesehen.

Durch die Prägung der Gegenelektrode entfällt die Notwendigkeit der oben beschriebenen Distanzscheibchen und der Wirkungsgrad des Wandlers wird wesentlich erhöht.

- 15 Gemäß einer Ausgestaltung der Erfindung weist die Gegenelektrode im Querschnitt ein Profil auf, welches in etwa einem Sinusverlauf entspricht.

- 20 Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist der Abstand zwischen der Membran und der Oberfläche der Gegenelektrode im Wesentlichen sinusförmig.

Gemäß einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung weist die Gegenelektrode im Querschnitt mindestens ein trapezförmiges Element auf.

- 25 Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung der Erfindung weist die geprägte Gegenelektrode Erhebungen derart auf, dass ein Luftspalt

zwischen Membran und den Erhebungen der Gegenelektrode kleiner als die Höhe der Erhebungen ist.

Die Erfindung betrifft ebenfalls einen Lautsprecher mit einer Vielzahl von oben beschriebenen Ultraschallwandlern.

- 5 Weitere Aspekte der Erfindung sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert.

Fig. 1 zeigt eine Veranschaulichung des Verlaufs des Schalldruckes,

- 10 Fig. 2 zeigt eine Veranschaulichung eines typischen Frequenzganges eines Ultraschallwandlers,

Fig. 3 zeigt einen prinzipiellen Aufbau des Ultraschallwandlers mit geprägter Gegenelektrode gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel,

- 15 Fig. 4 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus Fig. 3,

Fig. 5a zeigt eine Draufsicht auf die Gegenelektrode gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel,

Fig. 5b zeigt einen Querschnitt der Gegenelektrode gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel,

- 20 Fig. 6 zeigt eine Außenansicht eines Miniaturwandlers,

Fig. 7 zeigt eine Darstellung eines Amplitudenfrequenzganges der Miniaturwandlers von Fig. 6,

Fig. 8 zeigt eine Darstellung eines Amplitudenfrequenzganges, und

Fig. 9 zeigt einen prinzipiellen Aufbau eines Ultraschallwandlers gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel.

In Fig. 3 ist die stark vereinfachte Konstruktion eines Ultraschallwandlers gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel gezeigt. Es ist eine geprägte Gegenelektrode G und eine Membran M gezeigt. Aus Fig. 3 ist ersichtlich, dass die Erhebungen relativ große Flächen haben. Da die Membran M im Idealfall nur auf den höchsten Punkten der Erhebungen liegt, sind die Verluste an schwingungsfähiger Membranfläche identisch mit denen beim Multi-Support-Wandler. Was aber die Anregungskräfte betrifft, hat die Variante mit der geprägten Gegenelektrode wesentliche Vorteile, da der Luftspalt zwischen Membran M und Gegenelektrode G im Bereich der Erhebungen kleiner als die Höhe der Erhebungen ist. Die Anregungskräfte in diesen Bereichen sind offensichtlich wesentlich höher, als in den Bereichen zwischen den Erhebungen und dadurch steigt der Wandlerwirkungsgrad. Durch die optimale und präzise Prägung der Gegenelektrode kann man Multi-Support-Wandler nicht nur wesentlich vereinfachen (die Notwendigkeit der Distanzscheibchen entfällt), sondern auch seinen Wirkungsgrad wesentlich erhöhen.

Fig. 4 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt von Fig. 3. Hier ist eine Erhebung bzw. ein Element der Gegenelektrode G vergrößert gezeigt. Der Luftspalt zwischen Erhebung und Membran M ist kleiner als die Höhe der Erhebungen.

In Fig. 5a und 5b ist eine bevorzugte Geometrie der Gegenelektrode dargestellt. In Fig. 5a ist die hexagonale (dichteste) Verteilung von geprägten Erhebungen als Beispiel gezeigt. In Fig. 5b ist der Querschnitt A-A mit sinusförmiger Geometrie der unterstützenden Multi-Point – Struktur gezeigt, welche eine sinusförmige Kurve darstellt. Auf die ganze Fläche der Membran wirken dabei größere Kräfte als bei bekannten

Ultraschallwandler. In den Bereichen zwischen Erhebungen, wo die Membranauslenkung am größten ist, bleibt der Abstand zwischen Membran und Gegenelektrode ausreichend, um das Anklatschen der Membran zu vermeiden.

- 5 Die Erhebungen müssen oben unbedingt abgerundet sein, da die spitze Form führt zu elektrischen Durchschlägen der Membran.

Die Prägung der Gegenelektrode kann selbstverständlich auch trapezförmig sein, was bei den Wandler für den Frequenzbereich 30-50 kHz vorteilhaft ist.

- 10 In den oben gezeigten Beispielen liegt eine metallisierte Kunststoffmembran M dabei direkt auf den Erhebungen der Gegenelektrode auf. Die Kunststoffmembran kann beispielsweise PET-, PI- und Teflonfolien darstellen und eine sehr hohe elektrische Durchschlagfestigkeit aufweisen. Mit 3 μ Mylar-Membran beträgt z. B. die
15 maximale zulässige Spannung ca. 300 V.

- Die neu entwickelte Prägungstechnologie erlaubt eine präzise und optimale Formgestaltung der Erhebungen nicht nur für kleine, sondern auch für großflächige (bis DIN A3) Wandler. Für Audiobeam-Anwendung kann ein Wandler in der Größe 20x30 cm bzw. 182x289 mm hergestellt
20 werden.

- Ein geprägtes Lochblech kann auf eine vorgefräste Aluminiumplatte geklebt werden. Eine Alu-Rahme mit der geklebten Membran ist mit Kunststoffschrauben mit der Grundplatte verbunden. Im Randbereich muss zwischen der Membranrahme und dem Lochblech unbedingt eine
25 Schutzfolie vorgesehen sein.

Der Frequenzgang des Wandlers (gemessen bei Gleichspannung 200 V und Wechselspannung 100 V) weist im breiten Frequenzbereich der Wandler sehr hohe Schalldrücke auf.

Selbstverständlich könnten auch nicht unbedingt ebene Wandler hergestellt werden. Das könnte z. B. in den Fällen vorteilhaft sein, wo
5 eine sehr hohe Richtwirkung des Ultraschallwandlers unerwünscht ist.

Fig. 6 zeigt ein weiteres Beispiel mit einem kleinen Wandler mit dem Durchmesser von 14,5 mm und der Höhe von 4,7 mm.

In Fig. 7 sind zwei Frequenzgänge (20 kHz-200 kHz) des Wandlers mit
10 und ohne Lochgitter aus Fig. 6 gezeigt. Die Aufnahme erfolgte mit einem B&K Messmikrofon 4138 ohne Schutzgitter. Gemessen wurde in 10cm Abstand bei 200V Polarisationsspannung und 120V Signalspannung. Die effektive strahlende Fläche des Wandlers beträgt $0,93 \text{ cm}^2$; die Wandlerkapazität liegt bei ca. 60 pF.

15 In Fig. 7 repräsentiert die obere Kurve einen Wandler ohne Lochgitter. Der vorstehend angeführte typische Frequenzgangverlauf ist bei dieser Kurve gut erkennbar. Der erreichbare Schallpegel liegt über 120 dB SPL. Die untere Kurve wurde für einen Wandler mit Lochgitter gemäß Fig. 6 gemessen.

20 Da für viele Anwendungen ein breitbandiger Empfänger notwendig ist, kann auch ein entsprechendes Elektretmikrofon vorgesehen werden. Die Empfindlichkeit des Mikrofons beträgt ca. 1mV/Pa , sein Frequenzgang ist in Fig. 8 gezeigt. Für dieses Mikrofon wurde das gleiche Gehäuse benutzt, wie in Fig. 6 gezeigt.

25 Auf die Darstellung der Richtdiagramme kann an dieser Stelle bewusst verzichtet werden. Aus der Wandlergeometrie und den Wellenlängenbeziehungen lassen sie sich leicht berechnen.

Abschließend ist hervorzuheben, dass erstmals ein optimiertes und aufeinander abgestimmtes breitbandiges Wandlerpaar (Sender und Empfänger) angeboten werden kann, das ideale Voraussetzungen für zahlreiche neue Anwendungen eröffnet.

- 5 Selbstverständlich lassen sich z. B. auch zylindrisch gewölbte Wandler in dieser Technik herstellen. Das könnte in Fällen vorteilhaft sein, in denen die sehr hohe Richtwirkung des Ultraschallwandlers unerwünscht ist.

- Die oben angegebenen Daten und Gleichungen erlauben praktisch für
10 beliebige Wandlergrößen, den Schalldruck im Fernfeld zu berechnen.

- Fig. 9 zeigt einen prinzipiellen Aufbau eines Ultraschallwandlers gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel. Die Gegenelektrode G des Ultraschallwandlers weist Stege S auf, über die eine Membran M vorgesehen ist. Insofern entspricht der prinzipielle Aufbau dem Aufbau
15 aus Fig. 3. Die Stege S weisen eine Breite a auf und sind durch einen Abstand b voneinander beabstandet, so dass in dem Zwischenraum zwischen zwei benachbarten Stegen S ein Volumen V vorhanden ist, welches mit Luft ausgefüllt ist. Die Stege S sind vorzugsweise aus einem leitfähigen Material wie beispielsweise Aluminium gefertigt.
20 Alternativ dazu können die Stege S ebenfalls aus einem nichtleitenden Material wie beispielsweise Kunststoff gefertigt werden, wenn sie anschließend mit einer leitfähigen Schicht überzogen werden, d.h. es wird eine Metallisierung durchgeführt. Die Membran M kann eine wie in dem ersten Ausführungsbeispiel beschriebene Folie darstellen.

- 25 Die der Membran M gegenüberliegende Oberfläche der Stege S, ist vorzugsweise rau ausgestaltet.

Diejenigen Abschnitte der Membran, welche oberhalb der Zwischenräume zwischen den Stegen S angeordnet sind, tragen in

erster Näherung nicht zu der effektiven Anregung der Membran bei. Somit ist es wünschenswert, den Abstand zwischen den Stegen möglichst zu minimieren. Um der Luft in dem Volumen V zwischen den Stegen S Rechnung zu tragen, weisen die Stege S eine entsprechende Höhe h auf.

Mit anderen Worten lediglich an den Stellen zwischen den Stegen S und der Membran M können die gewünschten Coulombkräfte wirken. Eine Wechselwirkung zwischen Stegen S und Membran M tritt jedoch auch an den Rändern der Stege S aufgrund von Randeffekten RE auf. Diese Randeffekte RE sind erwünscht, da sie zum Antrieb aufgrund der Wechselwirkung oder der Coulombkräfte beitragen. Somit tragen die Randeffekte RE dazu bei, die Verluste zu minimieren. Der Abstand b zwischen den Stegen S kann so klein gewählt werden, dass die Randeffekte RE den Abstand b überstreichen, d.h. dass die Randeffekte RE zweier sich gegenüberstehenden Stegen S soweit in den Spalt dazwischen hineinragen bzw. wirken, dass sie sich berühren bzw. den Spalt überbrücken. Somit ist es vorteilhaft den Abstand zu verringern bzw. zu minimieren, um eine maximale Antriebskraft zu erhalten. Hierbei ist es weiterhin vorteilhaft, bei der Verringerung des Abstandes b zwischen den Stegen S gleichzeitig die Höhe h der Stege S und somit die Tiefe des Spaltes zu erhöhen. Hierdurch wird das Volumen des Spaltes im Wesentlichen konstant bzw. ausreichend groß gehalten, um die Schwingfähigkeit der Membran nicht zu sehr zu beeinträchtigen.

Wie in dem ersten Ausführungsbeispiel beschrieben, kann der Querschnitt der Stege im oberen Bereich trapezförmig oder im Wesentlichen sinusförmig bzw. abgerundet ausgebildet sein. Hier sollten weiterhin scharfe Kanten vermieden werden, um die hohe Feldstärke entsprechend zu vermeiden.

Die Stege S können beispielsweise eine Breite a von 100 μm sowie einen Zwischenabstand b von 20 μm aufweisen. Die Höhe h der Stege kann beispielsweise 100 μm betragen.

5 Die Stege S können als gerade Linien oder als konzentrische Kreise ausgestaltet sein. Andere Anordnungen sind ebenfalls möglich.

Durch das Vorsehen der Stege S mit einer entsprechenden Breite kann eine benötigte Anregungskraft und somit ein höherer Wirkungsgrad sichergestellt werden. Durch das Vorsehen der Zwischenabstände zwischen den Stegen S kann ferner die Schwingfähigkeit der Membran
10 M sichergestellt werden.

Die oben beschriebenen Ultraschallwandler lassen sich beispielsweise in Bewegungs- und Abstandssensoren, Anemometer, oder Flow-Meter verwenden.

Ansprüche

1. Ultraschallwandler, mit
 einer Membran und
 einer geprägten Gegenelektrode.
- 5 2. Ultraschallwandler nach Anspruch 1, wobei
 die Gegenelektrode im Querschnitt ein Profil aufweist, welches
 in etwa einem Sinusverlauf entspricht.
3. Ultraschallwandler nach Anspruch 2, wobei
 der Abstand zwischen der Membran und der Oberfläche der
10 Gegenelektrode sich im Wesentlichen sinusförmig verhält.
4. Ultraschallwandler nach Anspruch 1, wobei
 die Gegenelektrode im Querschnitt mindestens ein
 trapezförmiges Element aufweist.
5. Ultraschallwandler nach einem der vorherigen Ansprüche,
15 wobei
 die geprägte Gegenelektrode Erhebungen derart aufweist, dass
 ein Luftspalt zwischen Membran und den Erhebungen der
 Gegenelektrode kleiner als die Höhe der Erhebungen ist.
6. Ultraschallwandler nach Anspruch 1, wobei
20 die Gegenelektrode eine Vielzahl von Stegen (S) aufweist,
 welche eine Höhe (h) aufweisen und durch einen Abstand (b)
 voneinander beabstandet sind.
7. Ultraschallwandler nach Anspruch 6, wobei
25 der Abstand (b) zwischen zwei benachbarten Stegen (S) derart
 gewählt wird, dass jeweils am Rand der benachbarten Stegen (S)
 auftretende Randeffekte (RE) den Abstand (b) überbrücken.

8. Lautsprecher mit mindestens einem Ultraschallwandler nach einem der Ansprüche 1 bis 7.

Zusammenfassung

Es wird ein Ultraschallwandler mit einer Membran und einer geprägten Gegenelektrode vorgesehen. Durch die Prägung der Gegenelektrode
5 entfällt die Notwendigkeit von Distanzscheibchen und der Wirkungsgrad des Wandlers wird wesentlich erhöht.

(Fig. 3)